

## Introduction

L'étude des nouveaux matériaux hétérogènes est nécessaire au développement technologique. Leur étude en laboratoire est cependant longue et coûteuse en raison des nombreux essais à réaliser et des équipements dispendieux. Ce projet de thèse en cotutelle entre l'Université du Québec à Trois-Rivières et l'Université de Bretagne Sud est centré autour d'une approche prometteuse qui consiste à :

« Étudier le matériau de façon numérique. »

## Objectifs

1. Générer **automatiquement** des échantillons numériques du matériau
2. Calculer **automatiquement** les propriétés homogénéisées de chaque échantillon
3. Rassembler **automatiquement** les propriétés pour obtenir une représentation statistique du matériau numérique
4. Comparer les résultats numériques avec les résultats expérimentaux

« Avec plus d'une centaine d'échantillons numériques. »

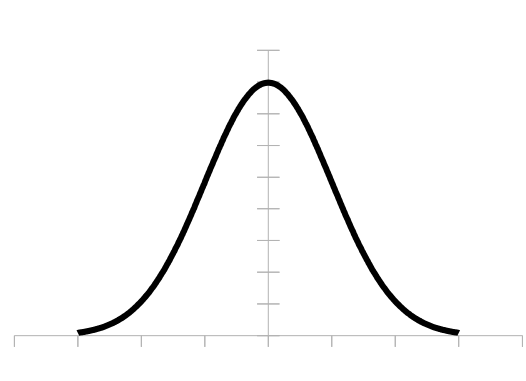
## Méthodologie

### Échantillon numérique

#### A) Génération du modèle CAO par addition séquentielle aléatoire

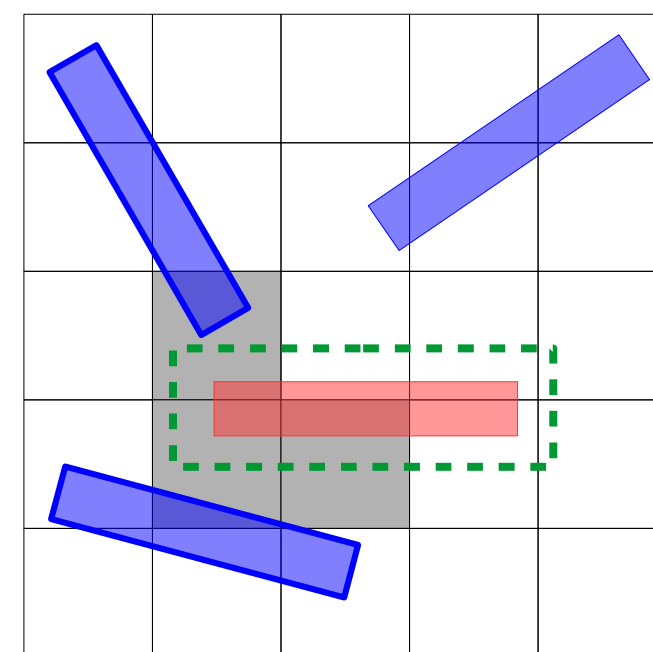
Paramètres géométriques de la particule (cylindre) :

- Rayon
- Longueur
- Position
- Orientation

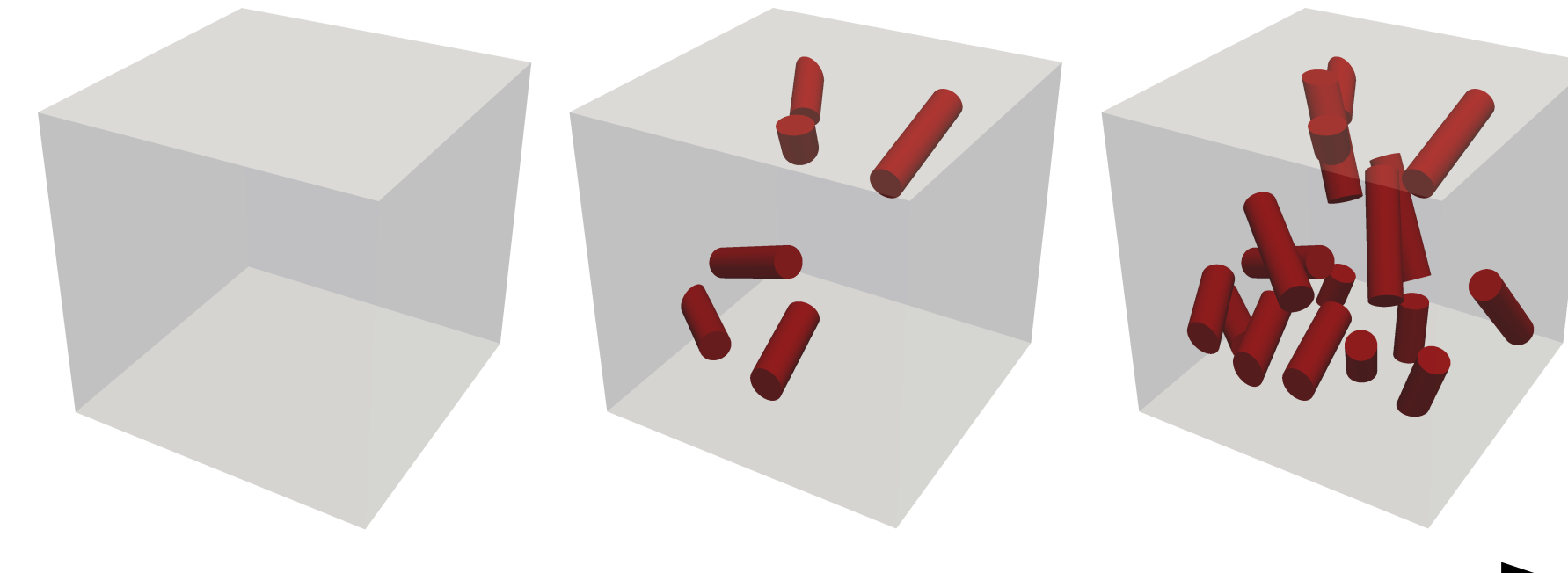


Critères d'insertion :

- Distance entre deux particules
- Fraction volumique de particules



**Figure 1** : Espace de voisinage : Calcul des distances minimales avec les particules voisines



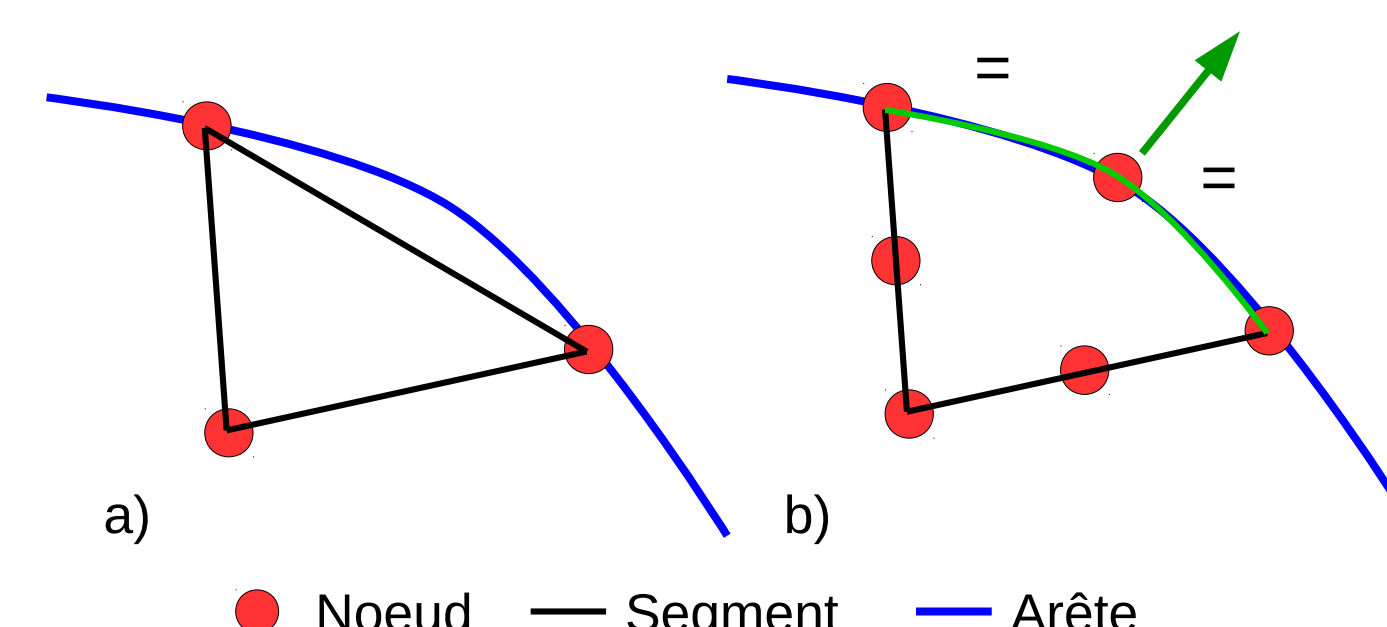
**Figure 2** : Cube (1x1x1). Particules cylindriques : rayon (0,05), longueur (0,4), distributions uniformes. Distance minimale (0,04). Fraction volumique cible (10%). Fraction volumique réelle (10,06%)

#### B) Génération du maillage de l'échantillon

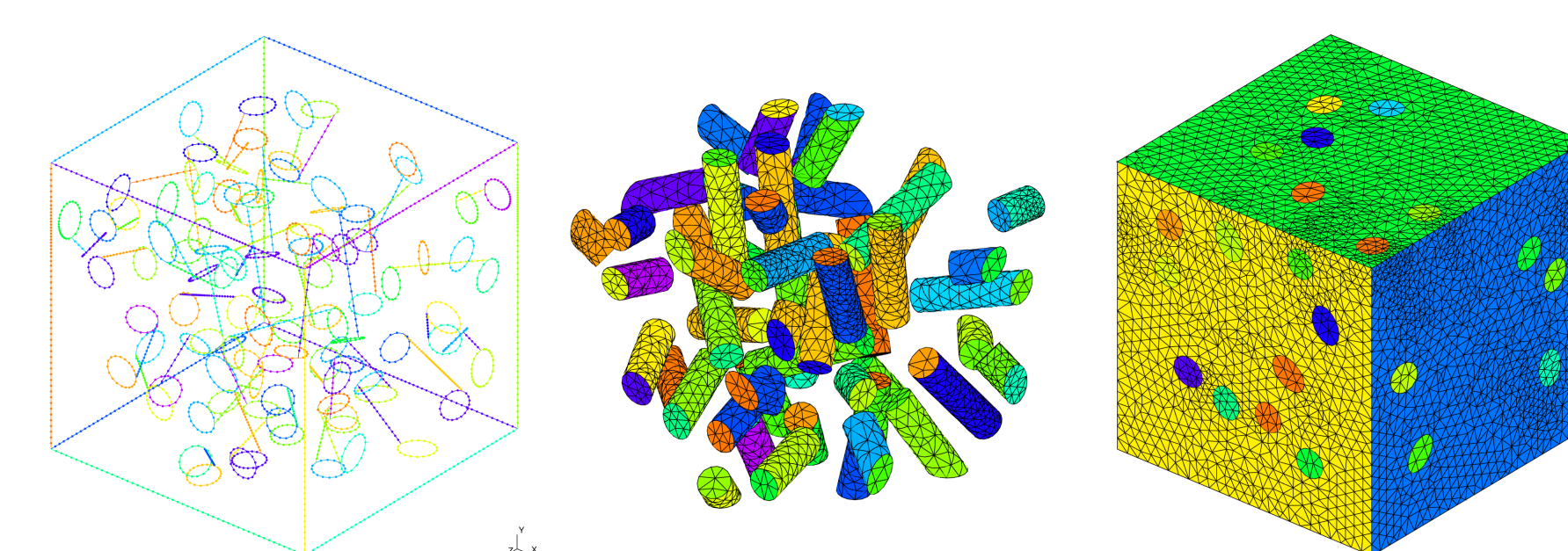
Séquence de maillage automatique :

1. Des sommets (noeuds)
2. Des arêtes (segments)
3. Des faces (triangles)
4. Des volumes (tétraèdres)

Contrôle de la taille des éléments à l'aide d'une carte de taille définie par les distances entre les particules



**Figure 3** : a) Éléments triangulaires linéaires  
b) Éléments triangulaires quadratiques avec nœud repoussé sur la frontière (arête)



**Figure 4** : a) Maillage des arêtes b) Maillage des faces des particules  
c) Maillage des faces du contour de l'échantillon d) Maillage volumique de l'échantillon

#### C) Conditions aux limites et calculs

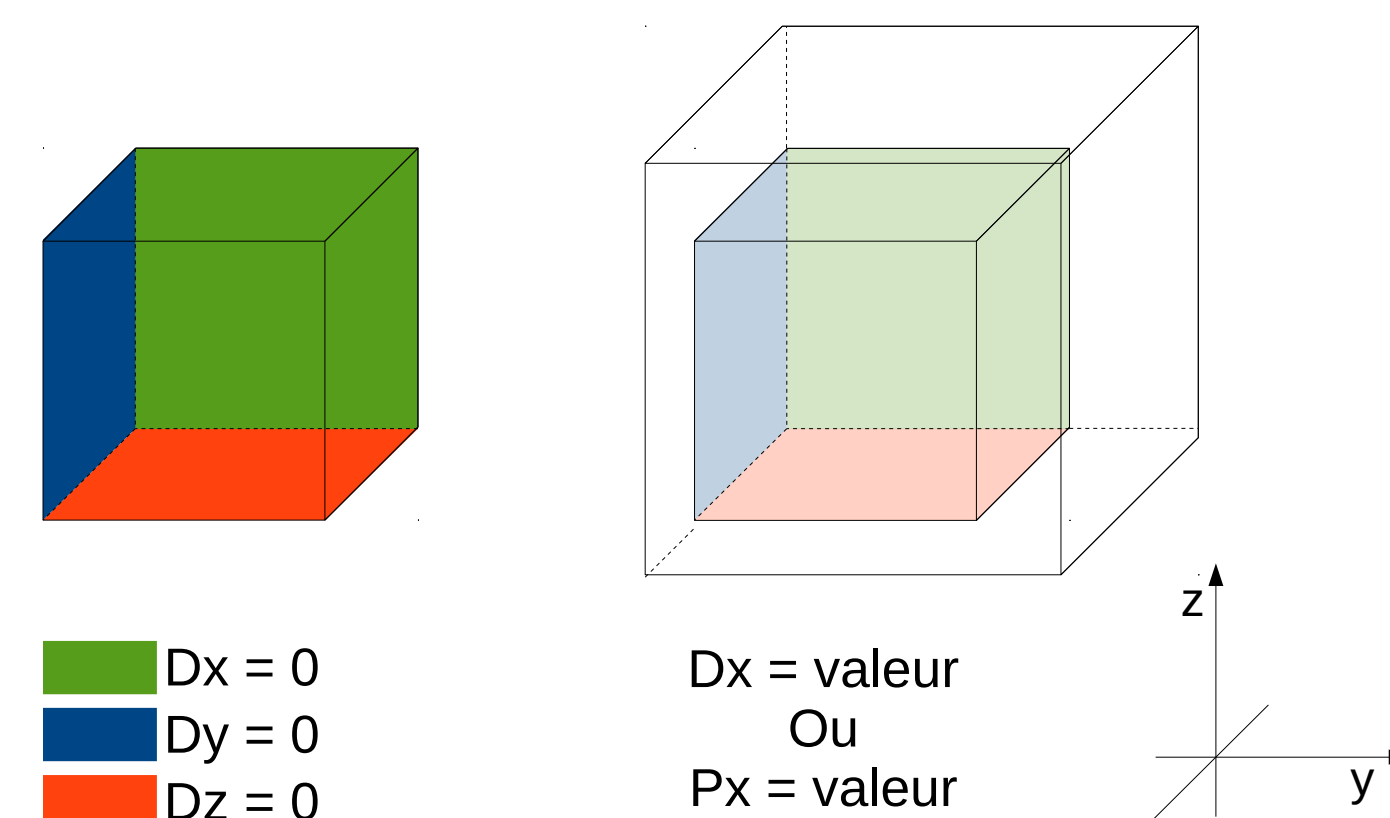
Types de chargement :

- Purement sphérique
- Purement déviatorique

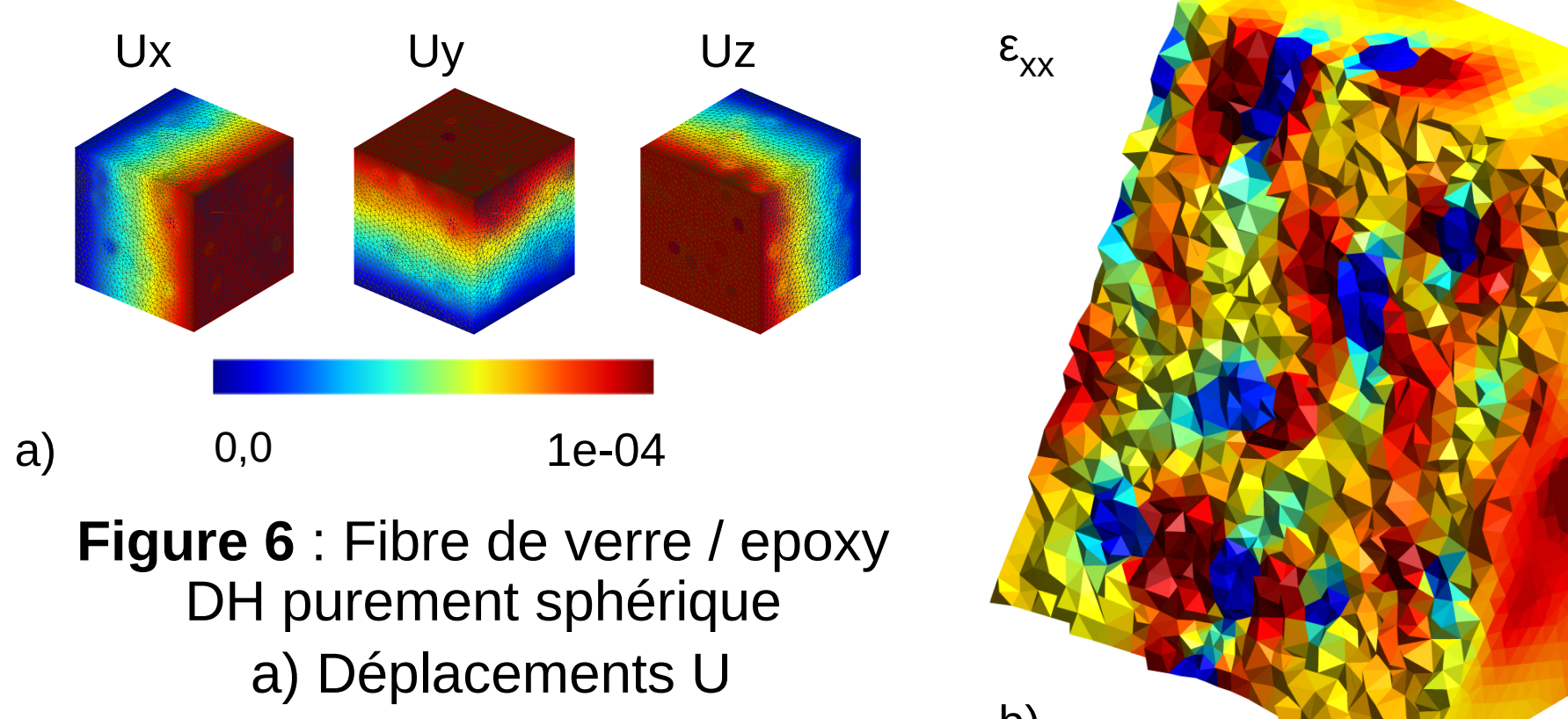
Types de conditions aux limites :

- Déformations homogènes (DH)
- Contraintes homogènes (CH)

Résolution : Statique linéaire



**Figure 5** : Chargement purement sphérique



**Figure 6** : Fibre de verre / epoxy  
DH purement sphérique

a) Déplacements U  
b) Déformations  $\epsilon_{xx}$   
c) Déformations  $\epsilon_{xy}$

## Pour $n$ échantillons

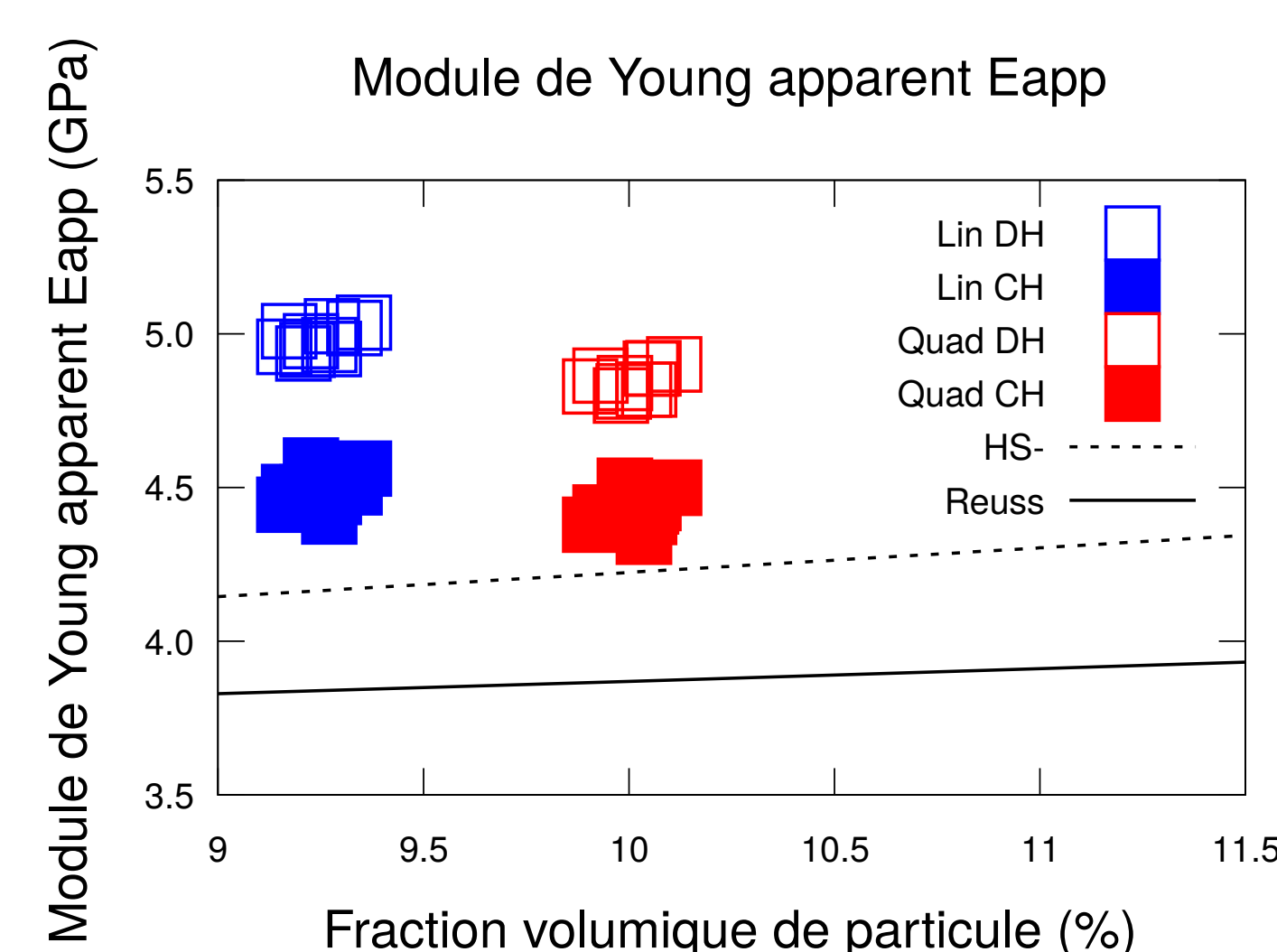
#### D) Homogénéisation

Calcul du module de compressibilité (éq. 1) et de cisaillement apparent (éq. 2) :

$$K^{app} = \frac{Tr(\underline{\underline{\Sigma}})}{3Tr(\underline{\underline{E}})} \quad (\text{éq. 1}) \quad G^{app} = \frac{1}{3} \left( \frac{\Sigma_{xy}}{2E_{xy}} + \frac{\Sigma_{xz}}{2E_{xz}} + \frac{\Sigma_{yz}}{2E_{yz}} \right) \quad (\text{éq. 2})$$

Calcul du module de Young (éq. 3) et coefficient de Poisson apparent (éq. 4) :

$$E^{app} = \frac{9K^{app}G^{app}}{3K^{app} + G^{app}} \quad (\text{éq. 3}) \quad \nu^{app} = \frac{3K^{app} - 2G^{app}}{2(3K^{app} + G^{app})} \quad (\text{éq. 4})$$



**Figure 7** : Module de Young apparent pour chaque configuration (10 échantillons)

**Tableau 1** : Résultats de l'homogénéisation numérique pour 10 échantillons

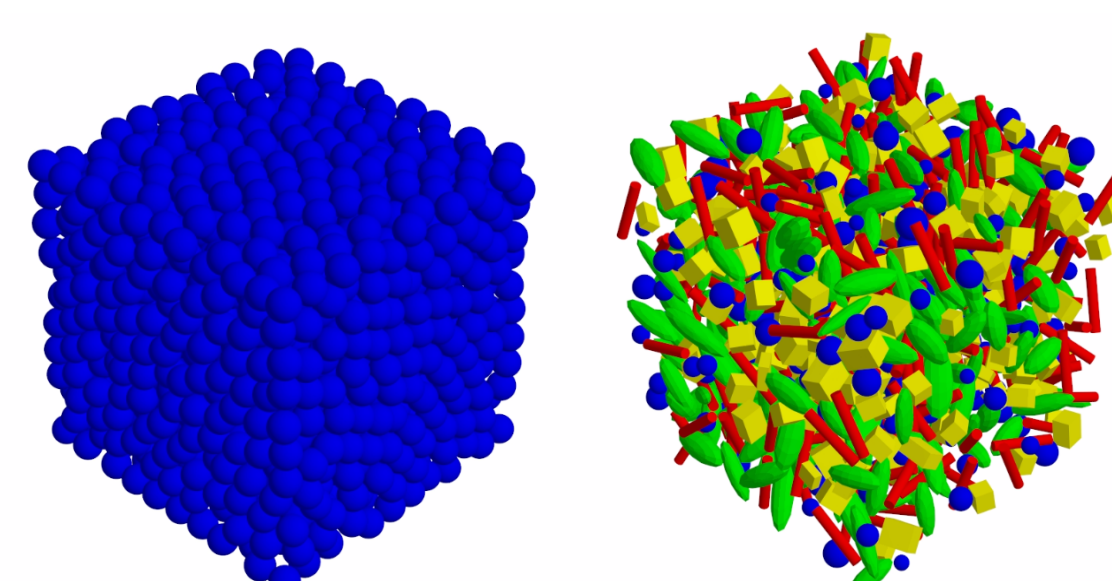
Types d'essais	$F_{vol}$ (%)	$E^{app}$ (GPa)
Linéaire DH	9,250 (0,064)	4,982 (0,036)
Linéaire CH	9,250 (0,064)	4,491 (0,050)
Quadratique DH	10,010 (0,062)	4,856 (0,036)
Quadratique CH	10,010 (0,062)	4,425 (0,051)
Borne de Reuss	-	3,868
Borne de HS-	-	4,223
Borne de HS+	-	7,519
Borne de Voigt	-	10,753

## Conclusions

- Objectif 1. : Réalisé
  - Objectif 2. : Réalisé
  - Objectif 3. : Réalisé
  - Objectif 4. : En cours
- Fin de la thèse : Hiver 2019

## Perspectives

Utiliser un logiciel de dynamique des corps rigides pour positionner les particules afin d'obtenir des fractions volumiques supérieures à 20%.



**Figure 8** : Distributions de particules obtenues par dynamique des corps rigides

## Remerciements

Les auteurs remercient le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), la Fondation de l'UQTR et le Ministère de l'Éducation et de la Recherche Français pour leur soutien financier.